

мохимии. – Рига: Зинатне. – 1975. – Ч. 2. – С. 198 – 201. **5. Синярев Г.Б.** Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / *Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов*. – М.: Наука, 1982. – 261 с. **6. Синярев Г.Б.** Расчет состава равновесных рабочих тел методом минимизации полных потенциалов / *Г.Б. Синярев* // Труды МВТУ им. Баумана. – 1973. – № 159. – С. 35 – 44. **7. Пархоменко В.Д.** Получение ферритовых порошков в потоках высокотемпературных теплоносителей / [*В.Д. Пархоменко, П.И. Сорока, Л.А. Голубков, П.В. Липатов*]. – К.: Наукова думка, 1988. – 152 с.

*Поступила в редколлегию 20.08.10*

УДК 691.175:519.2

**С.В. КОВАЛЬ**, доктор техн. наук, проф.,  
Варминско-Мазурский Университет, г. Олыштын, Польша

## **ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИИ ЗОЛЫ-УНОСА НА РЕОЛОГИЮ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА**

Показано влияние гранулометрического состава золы-уноса на реологические параметры и структурообразование цементной матрицы самоуплотняющегося бетона.

Influence of a grain size distribution of a fly ash on rheological parameters and structurization of a cement negative mould of self-compacting concrete is considered.

Современное инновационное строительство во многом связано с использованием «самоуплотняющихся» бетонов – SCC (Self-Compacting Concrete), способных уплотняться без вибрации в густоармированных конструкциях. что определяет ряд существенных преимуществ перед обычными – экономия рабочей силы, легкость перекачиваемости бетононасосами и др.

Для выполнения условий самоуплотнения состав обычного бетона должен быть существенно усложнен за счет введения пластифицирующих и других видов химических добавок, минеральных наполнителей (с размером дисперсных частиц  $< 0,125$  мм – микрокремнезем, зола-унос, молотый кварцевый песок и др.), многофракционных заполнителей.

Так как удельная поверхность золы-уноса польских ТЭЦ изменяется практически в 3 раза в зависимости от характеристик сжигаемого угля, технологии сжигания и типа фильтров [2] на одном из этапов разработки бето-

нов SCC [1] проанализировано влияние дисперсности золы уноса на реологические параметры цементной матрицы.

Для получения разных фракций использована зола тепловой станции «KWIDZYN S.A.» с содержанием несгоревшего угля менее 2 % (что допускается нормами).

Зола с исходной удельной поверхностью по Блейну  $s = 270 \text{ м}^2/\text{кг}$  была рассеяна на нормализованных ситах на три группы «монофракций»  $\Phi$ : «крупная» ( $\Phi_{кр} = 70 \div 100 \text{ мкм}$ ,  $s = 180$ ); «средняя» ( $\Phi_{ср} = 45 \div 70 \text{ мкм}$ ,  $s = 260$ ) и «мелкая» ( $\Phi_{мел} = 5 \div 45 \text{ мкм}$ ,  $s = 320$ ), из которых были также получены бинарные и тройные смеси. В этом случае практически в два раза изменялась её удельная поверхность ( $s = 200 \dots 500 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Исходная зола содержала фракции  $(24 \% \Phi_{кр}) + (21 \% \Phi_{ср}) + (55 \% \Phi_{мел}) = 100$ .

За счет изменения количества воды достигался практически одинаковый диаметр ( $D = 190 \pm 10 \text{ мм}$ ) расплыва цементной пасты из мини-конуса высотой 60 мм и диаметром в основании 100 мм).

Реологические характеристики, входящие в формулу Бингама (пластическая вязкость  $\eta$  и предельное напряжение сдвига  $\tau_0$ ), определялись на условно «равноподвижных» смесях. С позиций эффективности воздействия добавок целесообразно повышение вязкости «равнопластичных» смесей.

Так как самоуплотняющиеся смеси растекаются под собственной массой, допускались результаты определения вязкости  $\eta$  на наименьших скоростях [3].

На рис.1 показаны зависимости изменения вязкости «монофракционных» композиций трех составов № 4, 6, 10 (табл. 2) от скорости деформаций  $\gamma'$  (на участке  $0,045 \leq \gamma' \leq 2,0 \text{ с}^{-1}$ ), описанных с коэффициентом  $R^2 = 0,975 \dots 0,997$  степенной функцией типа  $\eta = Ax^{a1}$ .

Уменьшение размера частиц резко повышает вязкость, в том числе и из-за увеличения количества адсорбционно связанной поверхностью частиц воды. Анализ зависимостей изменения вязкости от скорости деформации (рис. 1) указывает на закономерный рост вязкости с увеличением дисперсности золы.

Из данных табл. 1 следует, что смеси фракций золы эффективны с позиций уменьшения вязкости цементных композиций, тогда как монофракционная мелкая фракция во всех случаях повышает вязкость.

Это может определяться пространственной структурой смеси микродисперсных зерен (их «укладкой») и (или) контактными взаимодействиями.

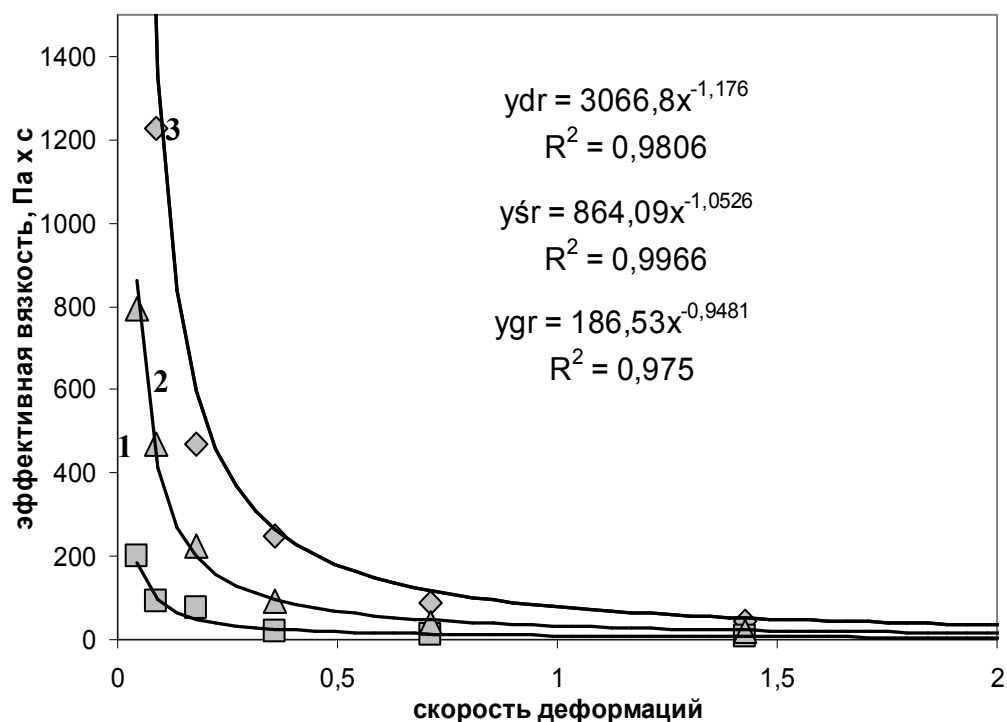


Рис. 1. Зависимости вязкости  $\eta$  от градиента скорости деформаций  $\gamma'$  для трех пластифицированных ( $BV = 0,7\%$ ) смесей с золой-унос ( $Z = 40\%$ ) фракций: 1 – крупная; 2 – средняя; 3 – мелкая.

Таблица 1

Составы и характеристики композиций

№	% фракций и добавок					$B/C$	$\eta$ Пас	$\tau^0 \times 10^3$ Па	$\tau$ $Pm = 0,5$ мин	параметры тепловыделения		
	$\Phi_{кр}$	$\Phi_{ср}$	$\Phi_{мел}$	$Z$	$BV$					$\tau_{ind}$ мин	$v_{max}$ В/кг	$Q$ Дж/г
1	33,3	33,3	33,3	40	0,7	0,393	22	22	228	420	1,02	30,5
2	0	0	100	40	1,0	0,339	63	14	272	480	1,16	29,8
3	0	100	0	40	1,0	0,383	38	5,2	228	650	1,14	34,6
4	100	0	0	40	1,0	0,463	35	0,68	448	590	1,16	35,1
5	0	50	50	20	1,0	0,296	47	1,0	330	430	1,28	41,8
6	0	50	50	30	0,4	0,379	30	0,6	461	410	1,27	47,2
7	50	0	50	20	0,4	0,339	40	0,47	440	410	1,38	50,3
8	50	0	50	30	0,7	0,336	19	1,7	363	390	1,33	45,8
9	50	50	0	30	1,0	0,354	29	9,0	382	390	1,34	42,9

Следовательно, правдоподобна нетривиальная гипотеза об улучшении реологических характеристик (с позиций бетонов типа SCC) за счет изменения гранулометрического состава ультрадисперсных зерен.

Присутствие поликарбоксилатной добавки осложняет определение рас-

плыва пасты и оценку погружения конуса, так как свойства цементной пасты с «консистенцией меда» не стабилизированы первое время. Поэтому предельное напряжение  $\tau_0$  (табл. 1) измеряли после 30 мин выдержки пасты.

Имеются данные [4], что для бетонных смесей SCC с диаметром расплыва конуса Абрамса 600-700 мм диапазон пластической вязкости составляет 60 – 120 Па·с, а предельное напряжение сдвига – 10 – 60 Па.

В нашем случае, наиболее эффективными с этих позиций следует признать составы № 5 и № 7 (табл. 1), содержащие в равной пропорции золы мелкой фракции со средней ( $50\Phi_{\text{мел}} + 50\Phi_{\text{ср}}$ ) или крупной ( $50\Phi_{\text{мел}} + 50\Phi_{\text{кр}}$ ).

По сравнению с составом № 2 (только мелкая фракция  $\Phi_{\text{мел}}$ ), состав № 5 характеризуется большими значениями  $\tau_0$  и имеет меньшее В/Ц, что положительно отражается на прочности.

Следует отметить, что провести корректное сопоставление значений, полученных на специальных (и, как известно, эксклюзивных) приборах типа «Реотест» для исследования бетонной смеси и значений  $\eta$  и  $\tau_0$  при исследовании цементных паст на вискозиметрах для вязких жидкостей при отсутствии влияющего на реологию заполнителя – песка и щебня, можно лишь условно. В то же время необходимость изучения таких реологических свойств цементных паст, как вязкость, водосодержание, предельное напряжение сдвига обусловлена непосредственной связью характеристик матрицы самоуплотняющегося бетона с технологическим качеством и эксплуатационными свойствами бетонов типа SCC.

С позиций формирования качественной матрицы бетона целесообразно было исследовать влияние фракций золы на параметры гидратации и структурообразования цементных композиций. Изменение фракций золы существенно влияет на кинетику структурообразования цементных паст, о чем свидетельствуют зависимости пластической прочности  $P_m$  от времени  $\tau$  (кривые на рис. 2а). Рассматривались составы с постоянным водо-цементным отношением без СП. В качестве одного из показателей интенсивности процесса, как и в п.5.1, принято время  $\tau$ , при котором составы характеризуются пластической прочностью  $P_m = 0,5$  МПа, отвечающей периоду формирования кристаллизационной структуры (который отвечает участку подъема кривой).

Анализ смесового треугольника (рис. 2б) с изолиниями  $\tau = \{P_m = 0,5 \text{ Па}\}$ , показывает, что управление фракционным составом золы за счет смешения мелких и средних фракций ( $0,61\Phi_{\text{мел}} + 0,39\Phi_{\text{ср}}$ ) позволяет интенсифицировать процессы структурообразования.

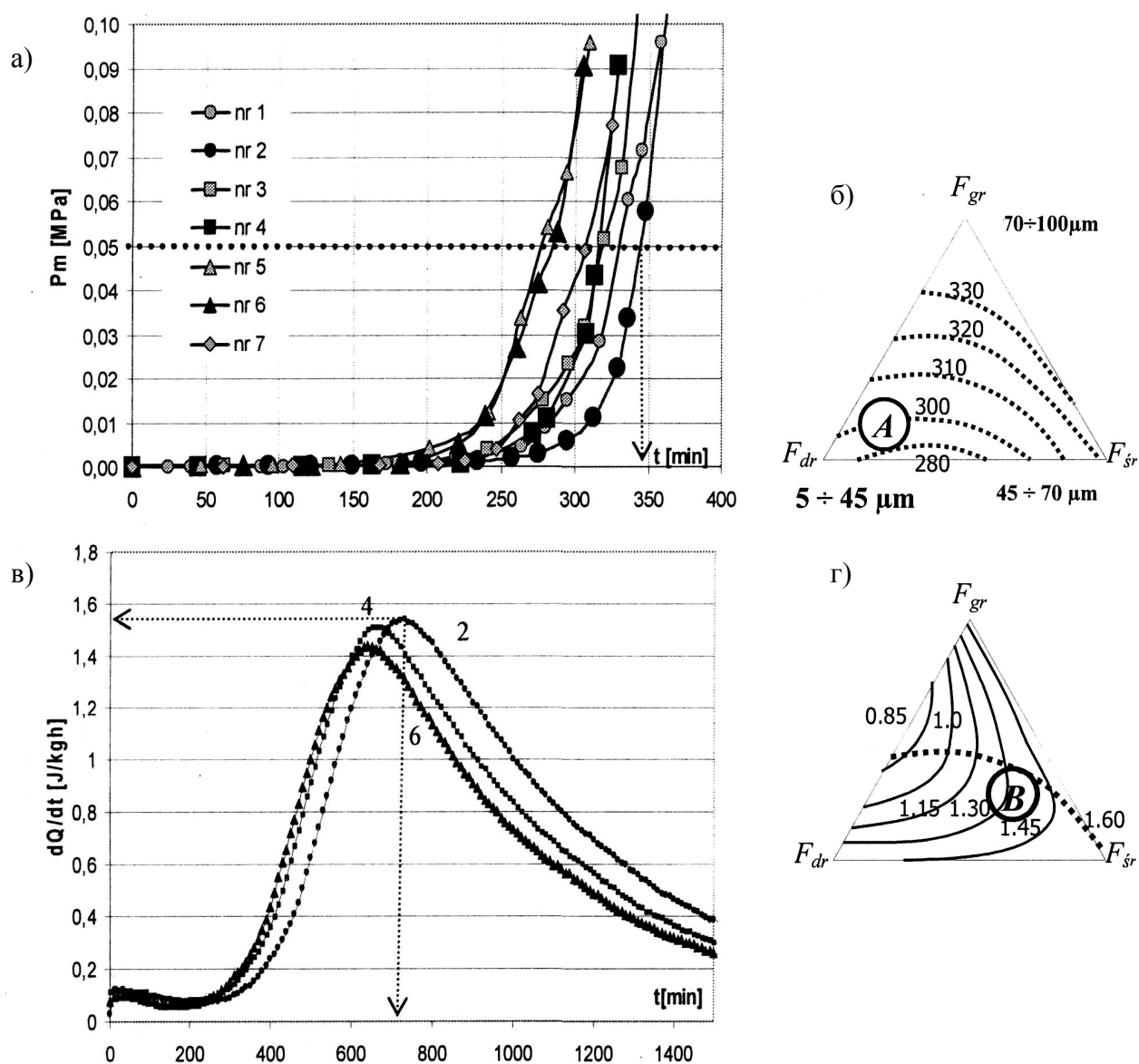


Рис. 2. Анализ влияния фракций на характеристики интенсивности структурообразования и гидратации смесей ( $Z = 30\%$ ,  $BV-10 = 0\%$ ):

а – кинетика пластической прочности  $P_m = \Phi(\tau)$ ;

б – время ( $\tau$ , мин) достижения  $P_m = 0,5$  МПа;

в – скорость тепловыделения ( $dQ/dt$ , В/кг); г – общее тепловыделение за 24 час ( $Q$ , Дж/г):

1 –  $\Phi_{кр} + \Phi_{ср} + \Phi_{мел}$ ; 2 –  $\Phi_{кр}$ ; 3 –  $\Phi_{кр} + \Phi_{ср}$ ; 4 –  $\Phi_{ср}$ ; 5 –  $\Phi_{ср} + \Phi_{мел}$ ; 6 –  $\Phi_{мел}$ ; 7 –  $\Phi_{кр} + \Phi_{мел}$

На рис. 2в показано изменение во времени скорости тепловыделения  $dQ/dt$  трех (из семи приведенных в табл. 1) составов, содержащих «крупную»  $\Phi_{кр}$ , «среднюю»  $\Phi_{ср}$  и «мелкую»  $\Phi_{мел}$  фракции золы уноса.

Зола-унос на ранней стадии гидратации относится к инертной в химическом отношении добавке.

С повышением крупности фракций термокинетические показатели еще больше ухудшаются (удлиняется индукционный период, сокращается время

максимума тепловыделения и общее количество выделенного тепла за 24 ч), что свидетельствует о её влиянии на замедление процесса гидратации.

Одновременно отмечается положительная роль «средней» фракции, так как показатель скорости  $dQ/dt$  достигает максимальных значений.

Сравнение смесевых диаграмм параметров временных зависимостей  $P_m$  и тепловыделения  $dQ/dt$  (рис. 2г) указывает на возможное отличие во влиянии гранулометрического состава на упрочнение структуры и на скорость реакций.

За счет оптимизации гранулометрического состава золы уноса достигается большая скорость твердения цементных композиций.

Эффективной может считаться средняя фракция ( $\Phi_{cp} = 70...90\%$ ) с добавлением мелкой ( $\Phi_{мел} = 10...30\%$ ) при минимизации крупной.

Однако, как указывалось выше, крупная фракция весьма полезна с позиций уменьшения предельного напряжения сдвига, что требует её увеличения до уровня  $\Phi_{кр} = 10...15\%$  при одновременном уменьшении  $\Phi_{мел}$  и  $\Phi_{cp}$ . Вариант оптимизированный гранулометрии  $15\% \Phi_{кр} + 60\% \Phi_{cp} + 25\% \Phi_{мел}$  (в области «В» на смесевом треугольнике рис. 2г) значительно отличается от состава исходной промышленной золы  $24\% \Phi_{кр} + 21\% \Phi_{sr} + 55\% \Phi_{мел}$  (область «А» на рис. 2б).

Проведенные исследования указывают на возможность улучшения реологических характеристик самоуплотняющегося бетона за счет оптимального гранулометрического состава высокодисперсной золы-уноса.

**Список литературы:** 1. Коваль С.В. Пути создания самоуплотняющихся бетонов / [С.В. Коваль, Д.М. Поляков, М. Цуак и др.] // Будівельні конструкції. – 2009. – Вип. № 72. – С. 232 – 238. 2. Ściubidło A. Zagospodarowanie popiołów lotnych z polskich elektrowni i elektrociepłowni poprzez modyfikację popiołów w materiały mezosporowate / A. Ściubidło, W. Nowak, I. Majchrzak-Kucęba // Międz. konf. EUROCOALASH. – Warszawa: EKOTECH Sp.z.o.o., 2008. – P. 163 – 179. 3. Emborg M. Rheology Test for Self Compacting Concrete / M. Emborg // RILEM Symp. on Self-compacting Concrete. – Sttckholm, 1999. 4. Wallevik O.H. Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete / O.H. Wallevik // 3 Int. Symp. on Self-compacting Concrete. – Reykjavik, Iceland, RILEM Publ. S.A.R.L., 2003. – P. 22 – 34.

*Поступила в редколлегию 20.08.10*